

520.40590X00  
IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant(s) : HOSOMI, et al.

Serial No.: Not yet assigned

Filed: August 30, 2001

Title: DISPERSION COMPENSATOR AND OPTICAL  
TRANSMISSION

Group: Not yet assigned

1c930 U.S. PRO  
09/941697  
08/30/01

LETTER CLAIMING RIGHT OF PRIORITY

Honorable Commissioner of  
Patents and Trademarks  
Washington, D.C. 20231

August 30, 2001

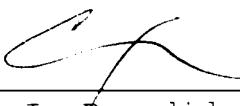
Sir:

Under the provisions of 35 USC 119 and 37 CFR 1.55, the  
applicant(s) hereby claim(s) the right of priority based on  
Japanese Patent Application No.(s) 2001-141290, filed  
May 11, 2001.

A certified copy of said Japanese Application is  
attached.

Respectfully submitted,

ANTONELLI, TERRY, STOUT & KRAUS, LLP

  
\_\_\_\_\_  
Carl I. Brundidge  
Registration No. 29,621

CIB/alb  
Attachment  
(703) 312-6600

Under the Paperwork Reduction Act of 1995, no persons are required to respond to a collection of information unless it displays a valid OMB control number.

# FEE TRANSMITTAL for FY 2000

Patent fees are subject to annual revision.  
Small Entity payments must be supported by a small entity statement, otherwise large entity fees must be paid. See Forms PTO/SB/09-12. See 37 C.F.R. §§ 1.27 and 1.28.

**TOTAL AMOUNT OF PAYMENT** (\$710.00)

Complete if Known

Application Number	
Filing Date	August 30, 2001
First Named Inventor	Kazuhiko HOSOMI
Examiner Name	
Group / Art Unit	
Attorney Docket No.	520.40590X00

105-950 U.S. PTO  
06/30/01

**METHOD OF PAYMENT** (check one)

The Commissioner is hereby authorized to charge indicated fees and credit any overpayments to:

Deposit Account Number  
01-2135

Deposit Account Name  
Antonelli, Terry, Stout & Kraus, LLP

Charge Any Additional Fee Required  
Under 37 CFR §§ 1.16 and 1.17

**2.  Payment Enclosed:**

Check  Money  Order  Other

**FEE CALCULATION (continued)**

**3. ADDITIONAL FEES**

Large Entity Fee Code (\$)	Small Entity Fee Code (\$)	Fee Description	Fee Paid
105 130	205 65	Surcharge - late filing fee or oath	0.00
127 50	227 25	Surcharge - late provisional filing fee or cover sheet	0.00
139 130	139 130	Non-English specification	0.00
147 2,520	147 2,520	For filing a request for reexamination	0.00
112 920*	112 920*	Requesting publication of SIR prior to Examiner action	0.00
113 1,840*	113 1,840*	Requesting publication of SIR after Examiner action	0.00
115 110	215 55	Extension for reply within first month	0.00
116 380	216 190	Extension for reply within second month	0.00
117 870	217 435	Extension for reply within third month	0.00
118 1,360	218 680	Extension for reply within fourth month	0.00
128 1,850	228 925	Extension for reply within fifth month	0.00
119 300	219 150	Notice of Appeal	0.00
120 300	220 150	Filing a brief in support of an appeal	0.00
121 260	221 130	Request for oral hearing	0.00
138 1,510	138 1,510	Petition to institute a public use proceeding	0.00
140 110	240 55	Petition to revive - unavoidable	0.00
141 1,210	241 605	Petition to revive - unintentional	0.00
142 1,210	242 605	Utility issue fee (or reissue)	0.00
143 430	243 215	Design issue fee	0.00
144 580	244 290	Plant issue fee	0.00
122 130	122 130	Petitions to the Commissioner	0.00
123 50	123 50	Petitions related to provisional applications	0.00
126 240	126 240	Submission of Information Disclosure Stmt	0.00
581 40	581 40	Recording each patent assignment per property (times number of properties)	0.00
146 690	246 345	Filing a submission after final rejection (37 CFR § 1.129(a))	0.00
149 690	249 345	For each additional invention to be examined (37 CFR § 1.129(b))	0.00
Other fee (specify) _____			
Other fee (specify) _____			

Reduced by Basic Filing Fee Paid

**SUBTOTAL (3) (\$ 0.00)**

**SUBMITTED BY**

Name (Print/Type)	Carl I. Brundidge	Registration No. (Attorney/Agent)	29,621	Complete (if applicable)
Signature		Telephone	703-312-6600	
		Date	August 30, 2001	

**WARNING:**

Information on this form may become public. Credit card information should not be included on this form. Provide credit card information and authorization on PTO-2038.

Burden Hour Statement: This form is estimated to take 0.2 hours to complete. Time will vary depending upon the needs of the individual case. Any comments on the amount of time you are required to complete this form should be sent to the Chief Information Officer, Patent and Trademark Office, Washington, DC 20231. DO NOT SEND FEES OR COMPLETED FORMS TO THIS ADDRESS. SEND TO: Assistant Commissioner for Patents, Washington, DC 20231.

日本国特許庁  
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office

出願年月日

Date of Application:

2001年 5月 11日

出願番号

Application Number:

特願2001-141290

出願人

Applicant(s):

株式会社日立製作所

JC930 U.S. PTO  
09/941697  
08/30/01



2001年 8月 10日

特許庁長官  
Commissioner,  
Japan Patent Office

及川耕造

出証番号 出証特2001-3072217

【書類名】 特許願

【整理番号】 NT01P0243

【提出日】 平成13年 5月11日

【あて先】 特許庁長官 殿

【国際特許分類】 G02B 27/56

【発明者】

【住所又は居所】 埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会社日立製作所 基礎研究所内

【氏名】 細見 和彦

【発明者】

【住所又は居所】 埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会社日立製作所 基礎研究所内

【氏名】 勝山 俊夫

【発明者】

【住所又は居所】 埼玉県比企郡鳩山町赤沼2520番地 株式会社日立製作所 基礎研究所内

【氏名】 李 英根

【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県横浜市戸塚区戸塚町216番地 株式会社日立製作所 通信事業部内

【氏名】 尾島 正啓

【特許出願人】

【識別番号】 000005108

【氏名又は名称】 株式会社日立製作所

【代理人】

【識別番号】 100068504

【弁理士】

【氏名又は名称】 小川 勝男

【電話番号】 03-3661-0071

【選任した代理人】

【識別番号】 100086656

【弁理士】

【氏名又は名称】 田中 恭助

【電話番号】 03-3661-0071

【選任した代理人】

【識別番号】 100094352

【弁理士】

【氏名又は名称】 佐々木 孝

【電話番号】 03-3661-0071

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 081423

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 波長分散補償器、及びそれを用いた光伝送システム

【特許請求の範囲】

【請求項1】

光パルス伝送路における伝送媒体の波長分散を補償する波長分散補償器において、少なくとも2種類以上の屈折率の異なる媒質の周期構造中に不均一要素を導入したフォトニック結晶を用いて分散補償導波路を構成し、前記フォトニック結晶の不均一要素を伝播する光の分散特性を用いて、前記波長分散の補償を行うようにしたことを特徴とする波長分散補償器。

【請求項2】

前記フォトニック結晶の不均一要素とその周囲の周期構造により結合した共振器を形成し、それを用いて前記波長分散の補償を行うよう構成したことを特徴とする請求項1記載の波長分散補償器。

【請求項3】

前記分散補償導波路における、前記フォトニック結晶の占める導波路部分の長さを変化せしめる構成とすることにより、前記波長分散の補償を行うようにしたことを特徴とする請求項1又は2記載の波長分散補償器。

【請求項4】

前記分散補償導波路における、前記フォトニック結晶の格子定数を変化せしめる構成とすることにより、前記波長分散の補償を行うようにしたことを特徴とする請求項1又は2記載の波長分散補償器。

【請求項5】

光入力信号の切替手段と、同一平面上に並置された、異なる波長分散を有する複数の分散補償導波路とを有し、かつ、前記分散補償導波路の各々が、結合した共振器を備えてなり、前記切替手段によって前記分散補償導波路を選択することにより、光伝送路における波長分散の補償量を制御するよう構成したことを特徴とする波長分散補償器。

【請求項6】

入力側光学系と、異なる波長分散を有する複数の分散補償導波路からなる導波

路アレイと、前記導波路アレイを移動せしめる駆動装置と、出力側光学系とを少なくとも備え、かつ、前記分散補償導波路の各々が、結合した共振器を備えてなり、前記導波路アレイを前記駆動装置で移動することによって光パルスが通過する前記分散補償導波路を選択し、光伝送路における波長分散の補償量を制御するよう構成したことを特徴とする波長分散補償器。

【請求項7】

前記結合した共振器が、少なくとも2種類の屈折率の異なる媒質の周期構造中に不均一要素を導入したフォトニック結晶を用いて形成されてなることを特徴とする請求項5又は6記載の波長分散補償器。

【請求項8】

前記分散補償導波路の各々における、前記フォトニック結晶の占める導波路部分の長さを異ならしめる構成とすることにより、前記波長分散の補償量を制御せしめてなることを特徴とする請求項7記載の波長分散補償器。

【請求項9】

前記分散補償導波路の各々における、前記フォトニック結晶の格子定数を異ならしめる構成とすることにより、前記波長分散の補償量を制御せしめてなることを特徴とする請求項7記載の波長分散補償器。

【請求項10】

請求項1記載の波長分散補償器を用いて、波長毎に光伝送路における波長分散を補償するよう構成したことを特徴とする光伝送システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光通信システムにおいて、光パルス伝送路における光ファイバーなどの伝送媒体の波長分散を補償するための波長分散補償器に関する。

【0002】

【従来の技術】

光伝送システムは、通常、光信号の伝送媒体として高純度のシリカ光ファイバーを用いる。しかしながら、光ファイバーは波長分散を持つ為に、一定の波長広

がりをもつ光信号パルスを伝送するとパルス波形が劣化する。光ファイバーの分散による光パルス波形の劣化は、光伝送システムの伝送距離や伝送容量を制限する大きな要因となる。このため、大容量光伝送システムにおいては、この波長分散を打ち消す技術が重要となる。例えば、光ファイバーの分散と逆の分散を有する光学系を光伝送路に挿入すれば、ファイバーの分散は相殺され、劣化した波形を修復することができる。

#### 【0003】

従来技術としては、符号が逆で絶対値の大きな分散を有するファイバー（分散補償ファイバー）を用いて分散を補償するという技術が実用化されている。分散補償ファイバーは、所望の特性を再現性よく実現できる、補償可能な帯域が広い、等の特徴があり広く用いられている。しかしながら、分散補償ファイバーの単位長さあたりの分散補償量は $-20\text{ p s/n m/k m}$ 程度と小さく、所望の分散量を得ようとすると非常に長いファイバーが必要となる。このため、小型化が不可能で、且つコストもかかるという問題がある。

#### 【0004】

波長分散補償器の小型化を目指した最近の技術として、二種類以上の屈折率の異なる媒質の多次元構造、即ちフォトニック結晶を用いた波長分散補償器が提案されている。フォトニック結晶を透過する光は、特有の分散特性を示すことが知られており、所望の波長の光に対し、適切な格子構造・周期・媒質の屈折率差を選択すると、大きな分散を得ることができる。例えば、特開2000-121987号公報にその具体例が開示されている。この波長分散補償器は、Si（シリコン）基板に二次元フォトニック結晶を作製し、分散を補償するというもので、長さ5mmで数十 $\text{p s/n m}$ の分散量を得ている。

#### 【0005】

しかしながら、二次元フォトニック結晶中を伝播する光は、散乱による損失が避けられないとされており、特開2000-121987号公報の開示例では挿入損失という点について考慮されていなかった。さらにまた、フォトニック結晶の分散関係を利用する場合は複雑な分散カーブの一部を局所的に用いることになり、所望の性能を得る為には極めて高度な作製精度が求められるとともに設計の

自由度は限られることになる。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】

従来技術に述べたように、長距離光ファイバー通信における分散補償に関しては既に実用化されているものもあるが、小型で低コストな分散補償器を実現できてはいない。

【0007】

また、伝送容量の増大に伴い、多数のチャンネルをより高密度に、広い波長領域にわたって用いることが必要になってきており、これに伴って波長分散をより精密に保証することが要求されている。さらにまた、外気温の変動による物性常数の変化等によって波長分散が時間変化するという課題を有するが、従来の分散補償の方式では、補償できる分散量は固定であり、時々刻々変化する光ファイバー中での波長分散を補償することはできない。このような課題に対応するため、状況に応じて柔軟かつ精密に補償量を変化できる分散補償器が求められる。

【0008】

そこで、本発明の目的は、超小型で、低コストで、分散補償量が可変な波長分散補償器及びそれを用いた光伝送システムを提供することにある。

【0009】

【課題を解決するための手段】

本発明による波長分散補償器は、フォトニック結晶の欠陥モードを用いて結合微小共振器導波路を構成し、かかる導波路を伝播する光の分散特性を用いることによって波長分散補償を行うことを特徴とする。

【0010】

本発明の原理と効果の説明にあたって、まずフォトニック結晶の欠陥が微小共振器として働く原理を説明する。次に、結合微小共振器導波路の概念と伝播特性を示し、これを用いた分散補償の原理を説明する。

【0011】

フォトニック結晶とは、屈折率の異なる二つあるいはそれ以上の数の媒質を組み合わせた多次元周期構造のことである。図2に示すのは、フォトニック結晶の

うち、二次元フォトニック結晶と呼ばれるものの一例である。図2は、紙面と水平方向には周期構造を有し、垂直方向の構造は一様な構造の断面図である。誘電率 $\epsilon_1$ の媒質に誘電率 $\epsilon_2$ の円柱が三角格子状に配置されている( $\epsilon_1 > \epsilon_2$ )。円柱の部分が空洞の場合は、 $\epsilon_2 = 1$ である。図2中、aは格子定数、rは円柱の半径を表す。

#### 【0012】

フォトニック結晶を伝播する光の波数と周波数の関係を示した図を、フォトニックバンド図という。図3は、図2の構造において、 $\epsilon_1 = 3.5$ 、 $\epsilon_2 = 1$ 、 $r/a = 0.45$ としたときのTMモードに対するフォトニックバンド図である。ここで、TMモードとは電場が紙面と垂直のモードのことを指す。縦軸は規格化周波数( $\omega a / 2\pi c$ )、横軸は第一ブリルアンゾーン内で規格化した波数ベクトル( $k a / 2\pi$ )を表す。cは真空中の光速、 $\omega$ は光の角周波数、kは波数をそれぞれ表す。図2の三角格子は六方対称に対応し、形成されるブリルアンゾーンは図3中に図示する正六角形構造である。正六角形の頂点がK点、各辺の中点がM点、波数が0である点がΓ点である。

#### 【0013】

図3中に斜線で図示するように、特定の(規格化)周波数領域では第一ブリルアンゾーン全域にわたってバンドが存在しない。これは、この帯域に対応する周波数の光はフォトニック結晶中を伝播できないことを意味する。このような、伝播が禁止された周波数帯域をフォトニックバンドギャップと呼ぶ。例えば、外部からバンドギャップに相当する波長の光を結晶に入射すると全反射される。

#### 【0014】

バンドギャップを持つフォトニック結晶に点欠陥、つまり周期構造中の不均一要素が導入された場合を考える。欠陥部では周期構造が乱れているので図3のバンド図は適用されず、バンドギャップ波長の光でも存在できる。しかし、欠陥の周囲は完全なフォトニック結晶なので、光は外部へ伝播できず欠陥内部に反射されることになる。図4は、このときの様子を概念的に示したものであるが、点欠陥とその周囲のフォトニック結晶は微小共振器を形成し、その内部で、光は多重反射を起こし、閉じ込められた状態となり、定常状態を形成する。このフォトニ

ック結晶欠陥内の光の定常状態を、欠陥順位と呼ぶ。

【0015】

欠陥が微小共振器として作用するためには、周りのフォトニック結晶で全反射されることが必要なので、欠陥準位は必ずバンドギャップに対応する周波数に存在する。欠陥の具体的な形状としては、 $\varepsilon_2$  の円柱（あるいは孔）の径を変化させる形状が一般的である。図4に示される欠陥は、一つの円柱の径を0とみなすことができるが、径を大きくしても欠陥順位は形成される。いずれにしろ、フォトニック結晶の形成技術さえあれば、微小共振器の作成には特段のプロセス技術を必要とせず、同一平面上に複数の微小共振器を作製することも可能である。

【0016】

以上説明したように、フォトニック結晶の欠陥を用いれば、単純な構造の微小共振器を比較的簡単に、また密度や位置に関して任意に作製できる。このような特徴は、以下に説明する結合微小共振器導波路の作製に極めて好適である。

【0017】

結合微小共振器導波路の特性に関しては、例えば、「オプティクス・レターズ(Optics Letters)、第24巻、711頁」に示されている。図5は、その光の伝播の様子を模式的にあらわしたものである。図に示されるように、結合微小共振器導波路とは、共鳴周波数（即ち、局在モードの周波数） $\Omega$ の微小共振器を、一定の間隔 $\Delta$ で連ねて配置した構造である。通常、微小共振器の中では光は内部反射を繰り返し、定在波を形成する。理想的な微小共振器が孤立して存在する場合、光子は内部に完全に閉じ込められ外部に出ることはない。

【0018】

しかし、適当な距離で他の共振器がある場合、微小共振器Iに閉じ込められた光の空間分布と微小共振器IIの光の空間分布に重なりが生じるため、二つの共振器の間でエネルギーの伝播が可能となる。このように、共振器間でエネルギーのやり取りがある場合を指して、「二つの共振器は結合している」という。

【0019】

図5に示すように、隣り合った二つが互いに結合した状態で多数の共振器を並べると、前記のエネルギー伝播が連続的に繰り返えされ、入射パルスは微小共振

器列中を次々に伝播していくことになる。これが、結合微小共振器導波路の原理である。

## 【0020】

結合微小共振器導波路中の光の伝播特性は、光が共振器に強く束縛され、隣の共振器とのみ相互作用するという、「固い結合の近似」(Tight Binding Approximation)でよく説明される。個々の共振器の共鳴角周波数を $\Omega$ 、結合共振器導波路を伝播する光の角周波数を $\omega$ とすると、「固い結合の近似」のもとでは、

$$\omega = \Omega (1 + \kappa \cos (k \Lambda)) \quad \dots \dots \dots (1)$$

という関係が成り立つ。ここで、 $\kappa$ は共振器同士の相互作用の強さに関わる量で、共振器の構造、共振器間の距離などによって決定される定数である。 $k$ は結合共振器導波路中の光の波数ベクトルである。(1)式にあらわされるように、 $\omega$ は、 $\Omega$ の $(1 \pm \kappa)$ 倍の範囲の値をとることがわかる。

## 【0021】

結合微小共振器を伝播する光の群速度 $V_g$ は、次の(2)式で表される。

## 【0022】

$$\begin{aligned} V_g &= d\omega/dk = -\kappa \Lambda \Omega \sin(k\Lambda) \\ &= \Lambda \Omega (\kappa^2 - (\omega/\Omega - 1)^2)^{1/2} \quad \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

(2)式から、群速度の絶対値は、 $\omega = \Omega$ のとき最大値 $\kappa \Lambda \Omega$ をとり、 $\omega = (1 \pm \kappa) \Omega$ のとき最小値の0をとることがわかる。一般に、波長分散 $D$ は、次の式で定義される。

## 【0023】

$$D = d(1/V_g)/d\lambda \quad \dots \dots \dots (3)$$

(3)式より、分散は群速度の逆数 $1/V_g$ の波長変化に対する傾きであることがわかる。群速度の絶対値の逆数 $1/V_g$ を $\lambda$ 関数とした場合の様子を、図6に示す。 $\lambda_0$ は、 $\omega = \Omega$ のときの光の波長である。 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ は、 $\omega = (1 \pm \kappa) \Omega$ のときの光の波長である。図示されるように、 $1/V_g$ は、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ で無限大となり、 $\lambda_0$ で最小値 $1/\kappa \Lambda \Omega$ となる、下に凸の形状をしている。

## 【0024】

図6のグラフに示されるように、 $1/V_g$ の傾きは、マイナス無限大から0を

経てプラス無限大まで、連続的に変化する。従って、これを分散補償器に応用した場合、第一に非常に大きな分散が得られ、第二に符号の正負も含めて必要な分散量を任意に選ぶことができる、という特徴を有する。

#### 【0025】

また、伝播に伴う損失は原理的に発生せず、实际上も、光は狭い領域に強く閉じこめられた状態で伝播するので、散乱等による損失は極めて小さいことが予測される。更に、微小共振器それ自体に光が強く閉じ込められているため、改めて導波路構造を形成する必要がなく、簡便なプロセスで作製が可能となる。

#### 【0026】

本発明は、以上説明したフォトニック結晶中の欠陥を伝播する光の分散特性を利用し、光パルス伝送路で生じた波長分散を補償する波長分散補償器である。本発明による波長分散補償器は、このように波長分散量が大きく、極めて小さなサイズで必要な分散補償量が得られる。例えば、駆動装置等を除いた構成で、従来のものと比べて、数百分の1以下の小型化が可能である。また、低損失で、光の閉じ込めの構造を設ける必要がなく、作製プロセスも通常の半導体プロセス技術を用いて容易に可能であるという利点がある。

#### 【0027】

##### 【発明の実施の形態】

###### （実施例1）

図1は、本願発明による可変分散補償器の第1の実施例を示す図である。図1(a)は、本発明による可変分散補償器の概観図を示す。図に示すように、本実施例は、互いに異なる分散補償量の導波路を複数個設置した導波路アレイ1と、導波路アレイ1を駆動する為の駆動装置2と、光信号の入出力のための入力側ファイバー3および出力側ファイバー4とから構成される。導波路アレイ1上には分散補償導波路5がn本配置されている。図中、5nは、n番目の分散補償導波路を示す。

#### 【0028】

図1(b)に、分散補償導波路5の構造を模式的に拡大して示す。分散補償導波路5は、通常導波路6と分散補償を担うフォトニック結晶欠陥導波路7が直列

に繋がれて構成される。図に、フォトニック結晶欠陥導波路7の長さをx、通常導波路6の長さをy1, y2と示されている。n本の分散補償導波路は、x+y1+y2の長さは同じであるが、xの長さは一本一本異なり、従って、分散補償量が異なる。導波路アレイ1の中から、所望の分散量に応じた分散補償導波路5を、駆動装置2を含む駆動系によって入力側光学系と出力側光学系の間に挿入して、光学経路を成立させるという構成である。

#### 【0029】

図1(c)は、図1(b)のPP'断面の断面図である。Si基板10に、SiO<sub>2</sub>層9、Si層8が順次積層され、Si層8には欠陥付二次元フォトニック結晶がパターニングされている。SiO<sub>2</sub>層9の層厚は3μm、Si層8の層厚は0.5μmである。フォトニック結晶の欠陥部以外の構造は、図2に示すものと同じ円孔三角格子配列で、格子間隔aは0.600μmと0.608μmの二種類を用いた。円孔の半径rは、いずれの場合も0.27μmとした。

#### 【0030】

欠陥の周期、構造は、図1(b)に図示するとおりである。欠陥付二次元フォトニック結晶層のSiの充填率は約27%で、平均屈折率は1.675である。欠陥付きフォトニック結晶層は、屈折率1.5のSiO<sub>2</sub>層9と、屈折率が1の空気に挟まれ、スラブ構造のコアとなる。また、フォトニック結晶欠陥付導波路7の両端に接続される通常導波路6として、本実施例ではSiリッジ導波路を用いた。リッジ高さはフォトニック結晶部分と同じ0.5μm、導波路幅は0.5μmとした。

#### 【0031】

次に、フォトニック結晶欠陥導波路の製造方法を、図7(a)から図7(f)を参照して説明する。基板には、SOI(Silicon on insulator: Si/SiO<sub>2</sub>/Siの積層構造)基板14を用いた。SOI基板14は、下地Si層13、厚さ3μmのSiO<sub>2</sub>層12、厚さ0.5μmのSi層11から成る。まず、図7(b)に図示するように、基板14に膜厚0.3μmのSiO<sub>2</sub>層15を熱CVDによってデポジションした。次に、図7(c)に示すように、電子線リソグラフィーによってSiO<sub>2</sub>層15上に、欠陥部分(不均一要素)17を含むレジ

ストパターン16を形成する。

【0032】

このレジストパターンをマスクとして、図7(d)に示すように、RIE(Reactive Ion Etching)を用いて $\text{SiO}_2$ 層15をエッティングした。酸素アッティングによってレジストパターン16を除去した後に、図7(e)に示すように、パターンが転写された $\text{SiO}_2$ 層15をマスクとして $\text{Si}$ 層11をECR(Electron Cyclotron Resonance)でエッティングした。このとき、 $\text{Si}$ 層11を完全にエッティングしてしまわずに、エッティング保護層として $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 程度の $\text{Si}$ 層18を残した。最後にフッ化水素系エッティング液で $\text{SiO}_2$ 層15を除去して、図7(f)に示す構造とした。図1(b)に示した前後の通常導波路も一連のプロセスで同時に作製される。

【0033】

以上のように、本発明におけるフォトニック結晶欠陥導波路は、通常の半導体プロセス技術を用いて作製することが可能である。

【0034】

次に、本波長分散補償器の $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 付近の入射光に対する分散補償能力を説明する。先述のように、分散量は、式(2)、(3)で与えられる。したがって、共振器の共鳴周波数 $\Omega$ 、欠陥の間隔 $\Lambda$ 、係数 $\kappa$ 、を元に分散量が算出できる。

【0035】

図8は、上記二次元フォトニック結晶において、一つの円孔の径を変化させた場合の欠陥準位を示す図である。縦軸が規格化周波数、横軸が変化させた円孔の半径 $r_d$ を示す。本実施例では、欠陥は円孔一つを完全に取り去った構造としているので、図8中の $r_d = 0$ に相当する。このとき対応する規格化周波数( $\Omega a / 2\pi c$ )は、0.39である。即ち、フォトニック結晶とその欠陥の作る微小共振器の共鳴周波数は $\Omega = 0.39 \times 2\pi c / a$ で与えられる。 $\Lambda$ は $2a\sqrt{3}$ となる。 $\kappa$ の値は、測定した群速度を計算式にフィッティングすることで決定した。本構造では、 $\kappa = -0.03$ であった。

【0036】

このように、フォトニック結晶の欠陥部分を、図4に示すような円孔を完全に取り去った構造とすることなく、円孔の径を変えることによっても波長分散量を制御できることがわかる。

#### 【0037】

このようにして得られた分散補償能力を図9に示す。縦軸は素子1mmあたりの分散量(D)、横軸は波長(λ)を示している。1.55μmの波長に対して、 $a = 0.600 \mu m$ の場合が-20ps/nm/mm、 $a = 0.608 \mu m$ の場合が+20ps/nm/mmの分散補償能力を持つ。

#### 【0038】

本実施例の可変分散補償器では、 $x + y_1 + y_2$ を10mmで固定し、 $x$ は-20ps/nm/mm、+20ps/nm/mmのそれぞれの導波路に対し1mmから1mmステップで8mmまでとした。これに通常導波路のみで構成した導波路(つまり、分散が実質的に0ps/nm/mmとみなせる導波路)を加えて、計17本の導波路をアレイ上に設置した。従って、本可変分散補償器の可変幅は-160ps/nmから+160ps/nm、分解能は20ps/nmである。

#### 【0039】

本実施例では、実施形例4で後述する光伝送システムに好適なように可変幅、分解能を設計したが、アレイに含む導波路の数、導波路の長さや、フォトニック結晶の構造等のパラメータを変えることにより、所望の仕様のものが作製できることは言うまでもない。

#### 【0040】

また、本実施形例では、分散補償導波路アレイ1上に複数の分散補償導波路5を設けて可変構造としたが、あらかじめ必要な分散量に最適化設計した分散補償導波路を一本のみ用いた場合でも、従来技術と比較して劇的に小型化された分散補償器を提供することが出来、大きな効果が得られる。

#### 【0041】

##### (実施例2)

図10は、本発明による可変分散補償器の第2の実施例を示す。本実施例は、入力側に $1 \times n$ の空間光スイッチ20、スイッチングを制御する制御装置22、

分散補償導波路アレイ1、出力側のn×1の光カップラ21から構成される。個々の分散補償導波路の具体的な構成は実施例1と同様である。本実施例では、光スイッチによって光学経路を切り替えることで、所望の分散量を持つ分散補償導波路5を選択する。

## 【0042】

## (実施例3)

実施例1及び2では、分散補償部の長さを変化させて異なる分散量の導波路アレイを構成した。導波路毎に分散補償量を変化させる他の方法を例示する。

## 【0043】

図11は、本発明の第3の実施例を示し、欠陥付きフォトニック結晶導波路7のフォトニック結晶の格子定数aが、導波路毎に異なる導波路アレイの様子を示したものである。格子定数aが異なると、個々の微小共振器の共鳴周波数、即ち(2)式中のΩが変わる。従って、孔の大きさが異なるフォトニック結晶欠陥導波路では同じ波長の光に対して分散が異なる。

## 【0044】

図12は、格子定数を変化させた場合の分散の変化の様子を示したものである。縦軸は分散量(D)、横軸は格子定数(a)を示す。この方法を用いた場合、分散補償導波路中の欠陥付きフォトニック結晶導波路の長さxを一定に保ったまま分散補償量を変化させることができる。

## 【0045】

## (実施例4)

実施例1乃至3では、分散量の定まった複数の複数の導波路を用意し、導波路を切り替えることで分散量を変化させていた。以下に、一本の導波路で連続的に分散量を変化させる方法を例示する。

## 【0046】

図16は、本発明の第4の実施例であり、電圧印加により分散量が可変な欠陥付きフォトニック結晶導波路の概観図と断面図を示したものである。図16(a)に図示するように、本実施例では、分散補償導波路がフォトニック結晶欠陥導波路と正電極105、負電極106とから構成される。図16(b)は、図16(

a) のAA' 断面図である。  $\text{SiO}_2$  層108 上に電気光学定数の大きな誘電体である  $\text{LiNbO}_3$  層107 が順次積層され、欠陥付き二次元フォトニック結晶がパターニングされている。  $\text{LiNbO}_3$  の屈折率は  $\text{SiO}_2$  よりも大きいので、空気と  $\text{SiO}_2$  をクラッドとするスラブ構造のコア層として働く。

#### 【0047】

次に、分散量を変化させる原理を説明する。正電極105と負電極106間に電圧を印加すると、図16 (b) に示すような電界がかかり、 $\text{LiNbO}_3$  層107の屈折率が変化する。この屈折率の変化により、結合した欠陥を伝わる光の特性に変化が生じる。図17は、電圧印加時の  $1/Vg$  の波長依存性カーブの変化を模式的に示したものである。電圧印加によって曲線全体がシフトし（矢印→で示す。）、信号光の使用波長での  $1/Vg$  の傾き、即ち分散量が変化することがわかる。屈折率の変化量は電界によって決定されるから、分散量は印加電圧で制御される。

#### 【0048】

以上説明したように、本実施例の分散補償導波路は、電圧印加によってその分散量を連続的に変化することが可能である。本実施例では、 $\text{LiNbO}_3$  を用いたが、電気光学効果の大きい他の非線形光学材料や、半導体、ポリマー等を用いても同様の効果が得られるのはいうまでもない。

#### 【0049】

##### （実施例5）

図18は、本発明の第5の実施例であり、分散補償導波路をファイバーグレーティングを用いて構成した例の概念図を示す。通常のファイバーグレーティングとは、コアの屈折率が周期的に変調されている光ファイバーで、これは1次元のフォトニック結晶とみなすことができる。

#### 【0050】

図18に示すように、本実施例では、屈折率  $\epsilon_c$  の光ファイバーのコア101に周期  $t$  で屈折率  $\epsilon_g$  ( $> \epsilon_c$ ) の高屈折率部102が設けられ、更に周期  $t$  の整数倍の周期  $T$  で欠陥103が設けられて、欠陥付きファイバーグレーティング104が構成されている。104は、1次元フォトニック結晶中の欠陥導波路の

一つの構成例である。本実施例では、欠陥103の屈折率は、 $\epsilon_c$ と等しく設定したが、他の屈折率にすることも可能である。本実施例での欠陥付きファイバーグレーティングの作成方法は、通常のファイバーグレーティングの作成方法で充分適用可能である。

## 【0051】

## (実施例6)

次に、本発明による可変分散補償器を適用した光伝送システムについて説明する。

## 【0052】

図13は、本発明の第6の実施例であり、実施例1に例示した可変分散補償器を用いた40Gb/s/チャンネルの波長分割多重光伝送システムを示す。このシステムは送信装置30、伝送ファイバーレンジ31、受信装置32から構成される。送信装置30は、各波長(チャンネル)ごとの電気-光変換器(E/O)33、波長多重器34、光送信増幅器35から構成されるが、これらは通例のものを持ってして十分である。使用波長は1.55μmを中心とした帯域とする。伝送ファイバーレンジ31には分散シフトファイバーを用い、伝送距離は80kmである。

## 【0053】

受信装置32は、光受信増幅器36、波長分離器37、実施例1に記載の本発明の可変分散補償器38、光-電気変換器(O/E)39から構成される。多重されて伝送された光パルスを波長分離装置37で各波長に分割し、可変分散補償器38で各々のチャンネルで最適な分散補償を行う。分散シフトファイバーの分散は、1.53~1.6μmで数ps/nm/km以下である。伝送距離80kmで、最大±200ps/nm程度の分散を受けるが、その値はチャンネル(波長)によって異なる。実施例1で詳細に説明したように、可変分散補償器38は可変幅±160ps/nm、分解能は20ps/nmであるから、全てのチャンネルに対して分散をほぼ補償することが可能である。

## 【0054】

## (実施例7)

次に、本発明による可変分散補償器を適用した光伝送システムの他の実施形態を説明する。

#### 【0055】

図14は、本発明の第7の実施例であり、本発明による可変分散補償器を用いた10Gbps/チャンネルの波長分割多重光伝送システムを示す。このシステムは、送信装置30、伝送ファイバ一路40、受信装置41から構成される。送信装置30の構成は実施形態4で例示したものと同様の構成である。伝送ファイバ一路40には $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 帯に最低分散領域を持つシングルモードファイバーを用い、伝送距離は80kmである。

#### 【0056】

即ち、本システムは、既設のシングルモードファイバーを用いて波長分割多重方式により大容量伝送を行う際に用いるシステムである。受信装置41は、本発明の可変分散補償器42、光受信増幅器36、波長分離装置37、実施例1に記載した可変分散補償器42、光一電気変換器(O/E)39から構成される。

#### 【0057】

本システムでは、波長分離装置37の前段に可変分散補償器42を設置し、複数のチャンネルを一括して補償する。そのために、可変分散補償器42の設計パラメータは、実施例1とは異なる。具体的には、フォトニック結晶の格子定数 $a = 0.585$ 、 $\kappa = 0.1$ 、 $\Lambda = 6a\sqrt{3}$ となる。このときの分散量(D)を、図15に示す。シングルモードファイバーと逆向きの分散スロープを示し、効果的な分散補償が可能である。

#### 【0058】

上述した、フォトニック結晶を用いた実施例では、フォトニック結晶の構造に、二次元の三角格子を用いた場合の例を主体に説明した。フォトニック結晶の構造は、一次元、二次元、三次元のさまざまな構造が提案されており、そのどれを用いても同様な効果を得られるのはいうまでもない。

#### 【0059】

#### 【発明の効果】

以上述べたごとく、本発明によれば、超小型で、安価で、分散補償量が可変な

波長分散補償器を得ることができる。更に、本発明の波長分散補償器を用いることにより、安価で、信頼性の高い光伝送システムを構築することが出来る。

【図面の簡単な説明】

【図1】

本発明による可変分散補償器の第1の実施例を示し、(a)は可変分散補償器の概観図、(b)は分散補償導波路の拡大図、(c)は(b)のP-P'断面図。

【図2】

二次元フォトニック結晶を示す図。

【図3】

図2に示す二次元フォトニック結晶に対応するフォトニックバンド図。

【図4】

フォトニック結晶中に設けられた欠陥中で光が局在モードを形成する様子を説明する概念図。

【図5】

結合した微小共振器を光が伝播する様子を説明する概念図。

【図6】

結合微小共振器導波路を伝播する光の $1/Vg$ を波長の関数として表した図。

【図7】

本発明の第1の実施例を作製するプロセスを説明する工程図。

【図8】

図2のフォトニック結晶に於いて、円孔の大きさを変化させたときに現れる欠陥準位を示すグラフ。

【図9】

本発明の第1の実施例における分散補償導波路の分散量の波長依存性を示す図

【図10】

本発明による可変分散補償器の第2の実施例の構成を示す図。

【図11】

本発明の第3の実施例における分散補償導波路アレイの概念を示す模式図。

## 【図12】

図11におけるフォトニック結晶欠陥導波路の、格子定数aを変化させたときの分散量の変化を示す図。

## 【図13】

本発明の第6の実施例を示し、可変分散補償器を用いた波長分割多重光伝送システムの構成を示す図。

## 【図14】

本発明の第7の実施例を示し、可変分散補償器を用いた波長分割多重光伝送システムの他の構成を示す図。

## 【図15】

図14の実施例における分散補償導波路の分散量の波長依存性を示す図。

## 【図16】

本発明の第4の実施例であり、連続可変分散補償導波路の構成を示す概観図（a）と断面図（b）。

## 【図17】

図16の実施例における分散補償導波路の分散量の波長依存性を示す図。

## 【図18】

本発明の第5の実施例であり、ファイバーグレーティングを用いた分散補償導波路を示す概念図。

## 【符号の説明】

1…分散補償導波路アレイ、2…駆動装置、3…入力側ファイバー、4…出力側ファイバー、5…分散補償導波路、6…通常導波路、7…フォトニック結晶欠陥導波路、8…Si層、9…SiO<sub>2</sub>層、10…下地Si層、11…Si層、12…SiO<sub>2</sub>層、13…下地Si層、電子線レジスト、14…SOI基板、15…SiO<sub>2</sub>層、16…レジストパターン、17…欠陥部分、18…Si層、20…空間光スイッチ、21…光カップラ、22…スイッチング制御装置、30…送信装置、31…伝送ファイバ一路、32…受信装置、33…電気一光変換器（E/O）、34…波長多重器、35…光送信増幅器、36…光受信増幅器、37…波長分離器、38…波長分散補償器、39…光一電気変換器（O/E）、40…

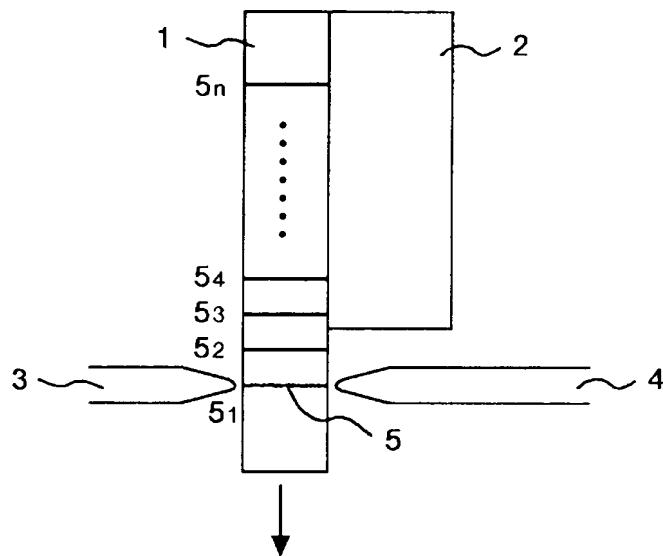
伝送ファイバ一路、41…受信装置、42…波長分散補償器、101…光ファイバーのコア、102…高屈折率部、103…欠陥、104…欠陥付きファイバーグレーティング、105…正電極、106…負電極、107… $\text{LiNbO}_3$ 層、108… $\text{SiO}_2$ 層。

【書類名】 図面

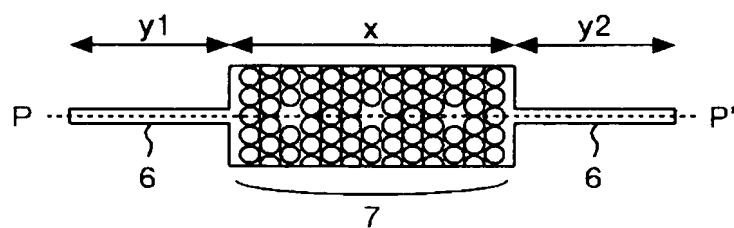
【図1】

図 1

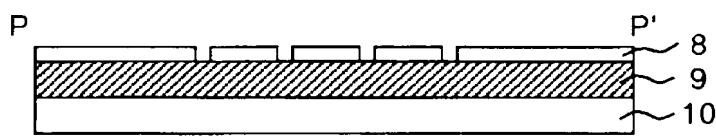
(a)



(b)

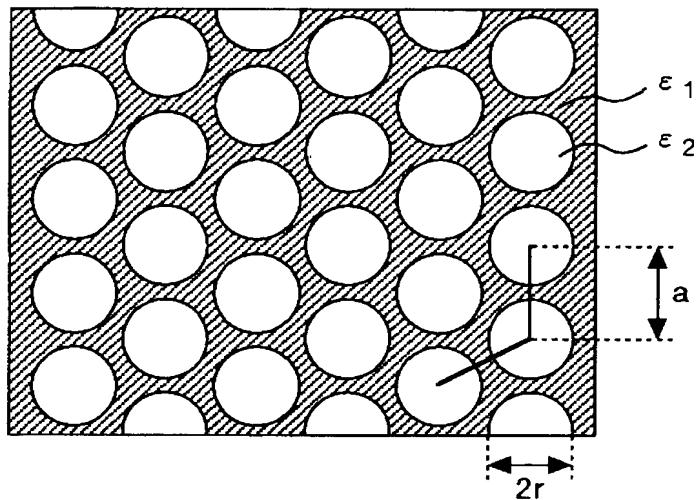


(c)



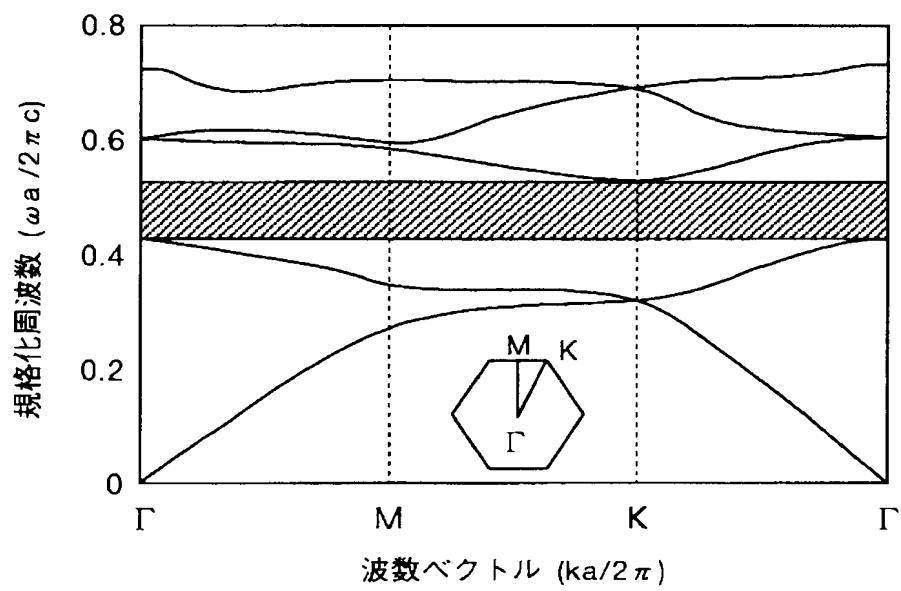
【図2】

図 2



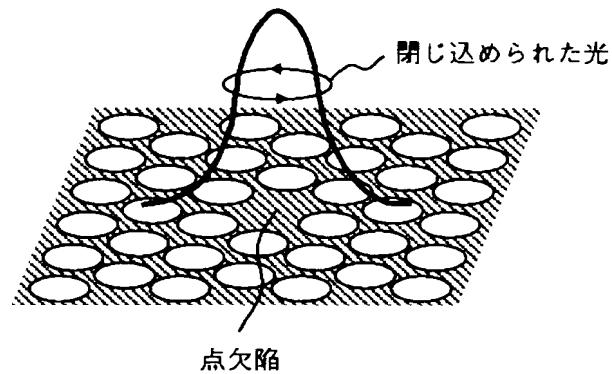
【図3】

図 3



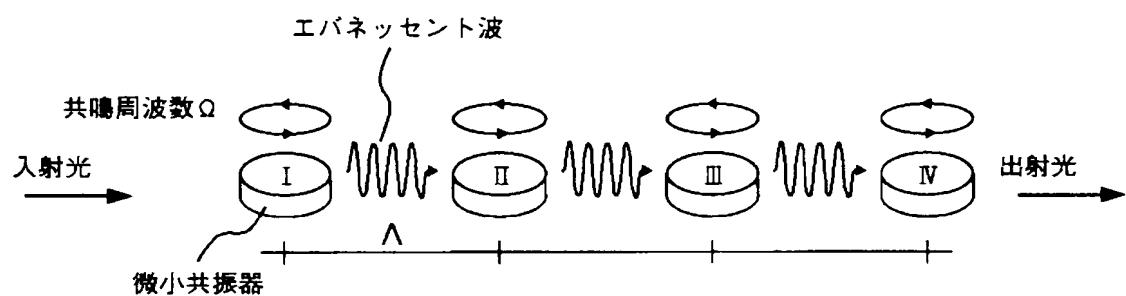
【図4】

図 4



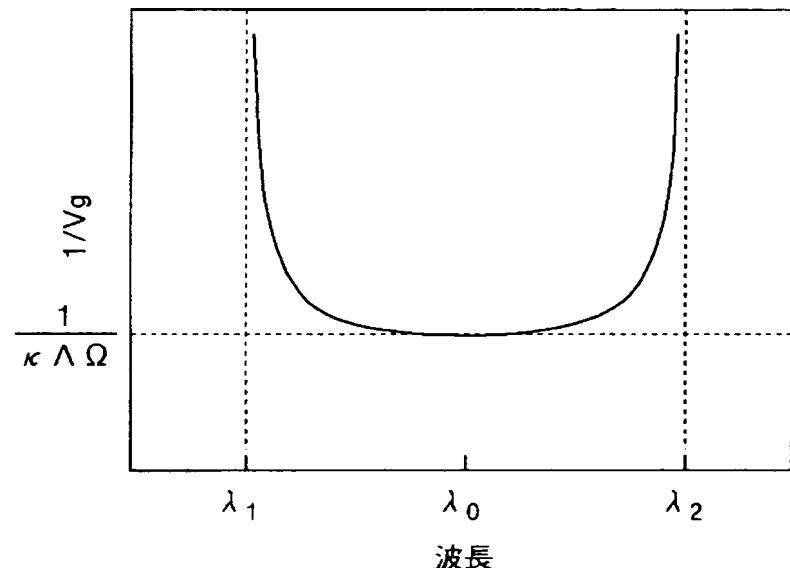
【図5】

図 5



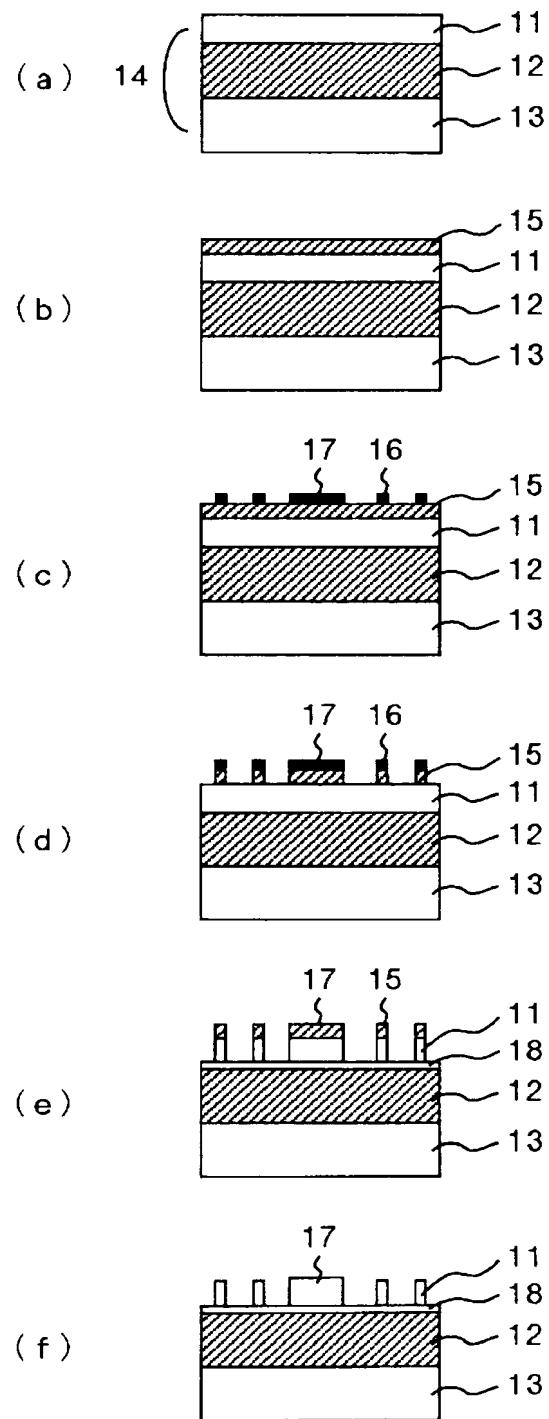
【図6】

図 6



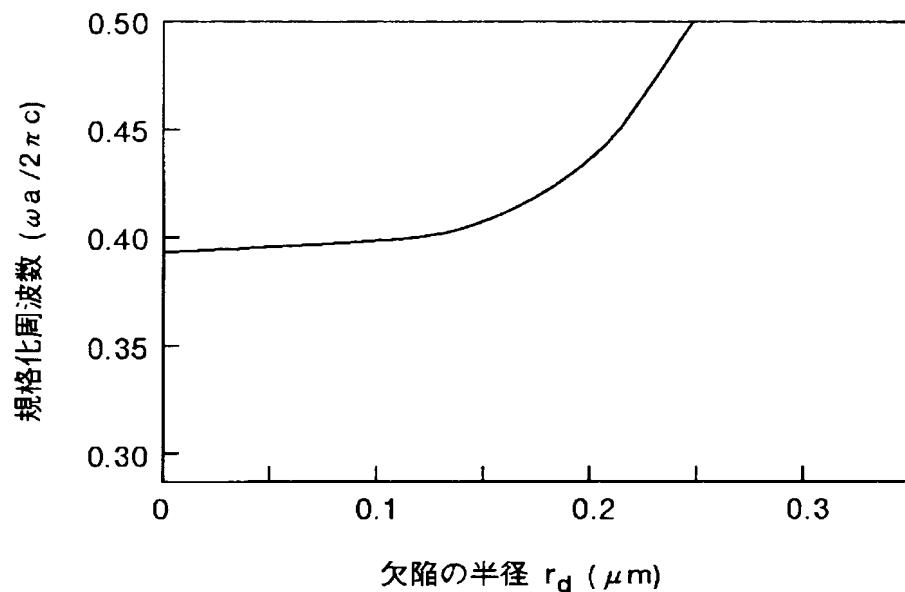
【図7】

図 7



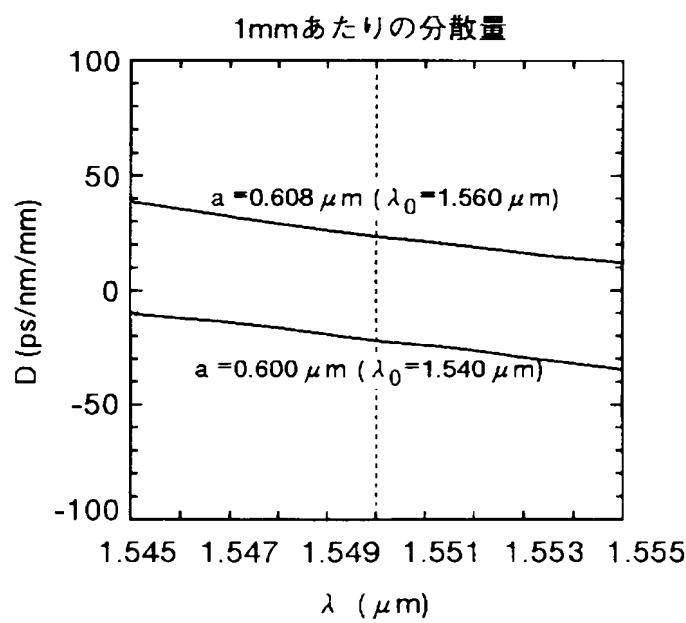
【図8】

図 8



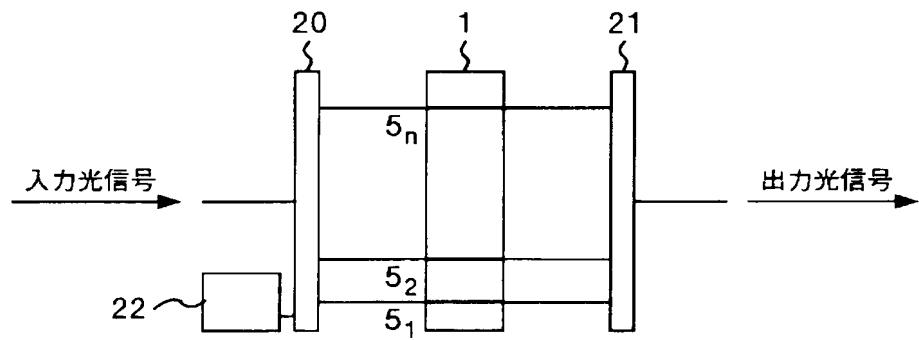
【図9】

図 9



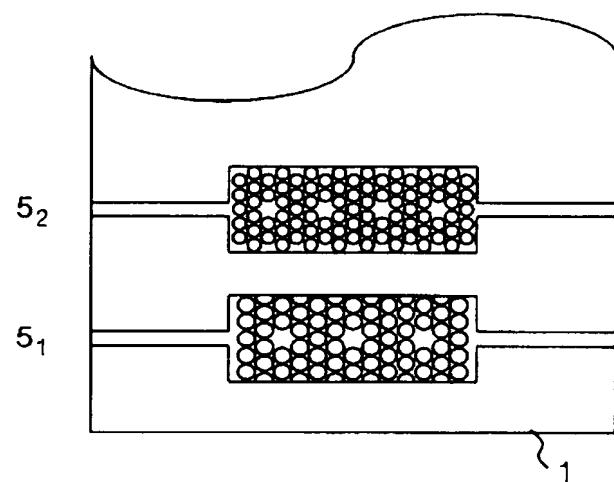
【図10】

図 10



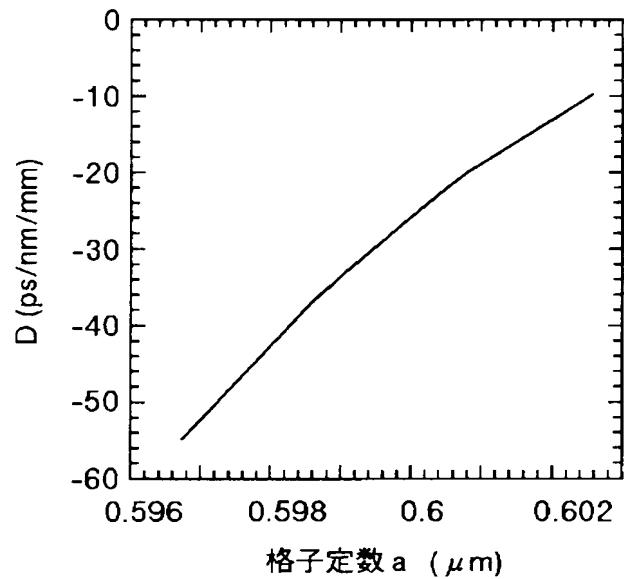
【図11】

図 11



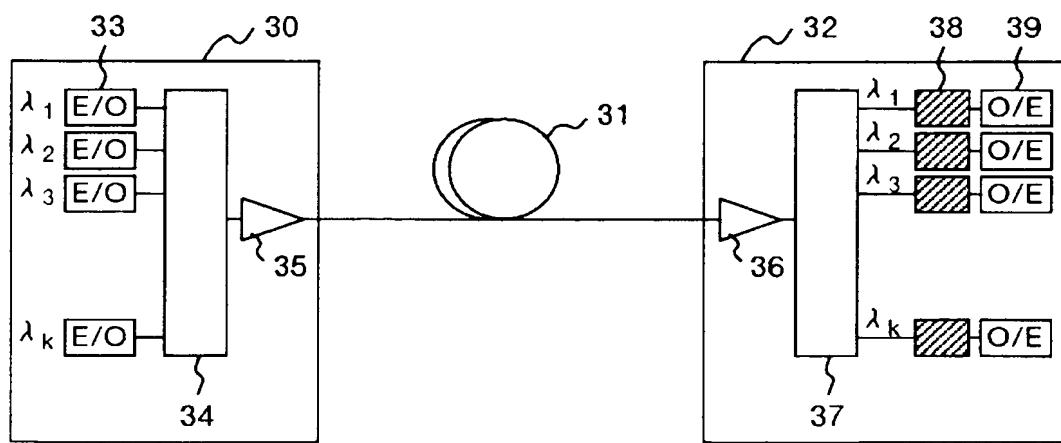
【図12】

図 12



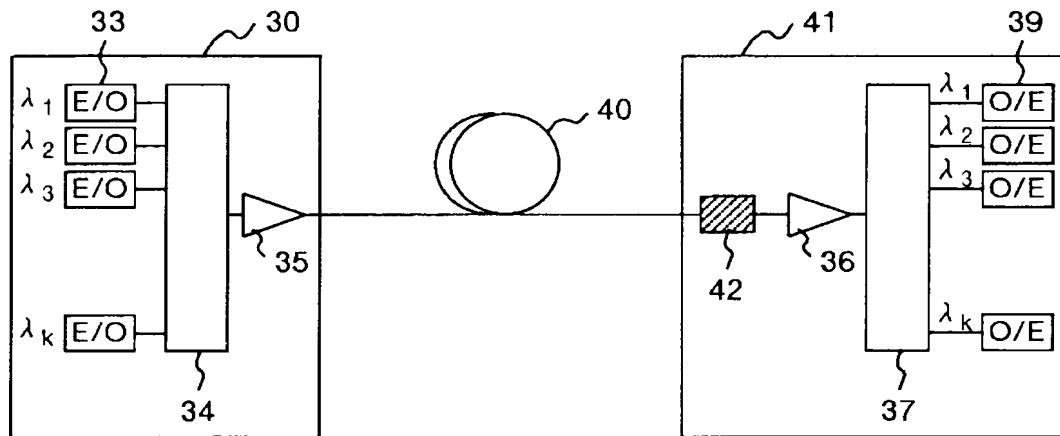
【図13】

図 13



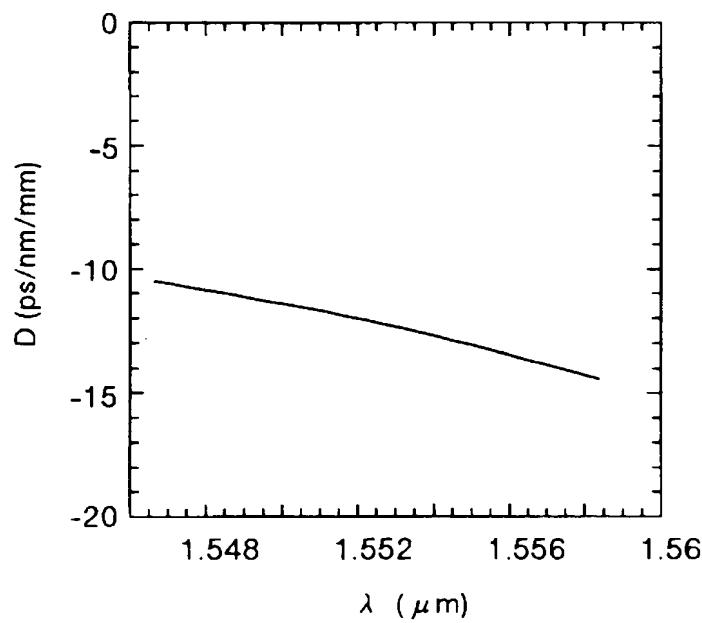
【図14】

図 14



【図15】

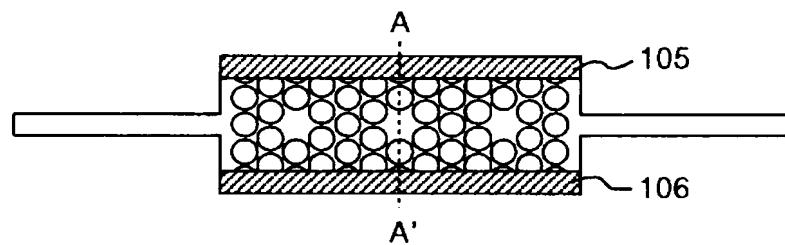
図 15



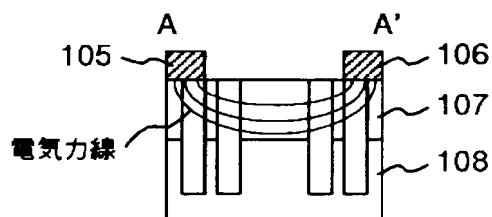
【図16】

図 16

(a)

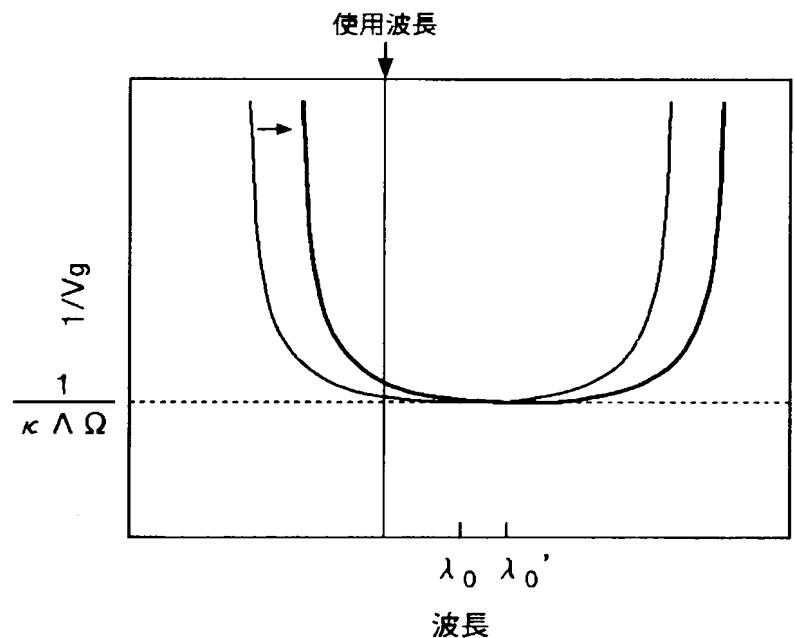


(b)



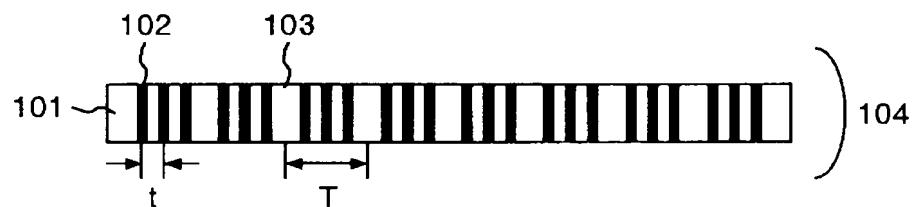
【図17】

図 17



【図18】

図 18



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】

超小型で、低成本で、分散補償量が可変な波長分散補償器およびそれを用いた光伝送システムを提供する。

【解決手段】

フォトニック結晶中の欠陥を伝播する光の分散特性を利用することによって、波長分散を補償する構成とした。互いに異なる分散補償量の分散補償導波路5を複数個設置した導波路アレイ1と、導波路アレイ1を駆動するための駆動装置2と、光信号の入出力のための光ファイバー3、4から構成される。分散補償導波路5は、通常導波路6と分散補償を担うフォトニック結晶欠陥導波路7で構成され、導波路7の長さを1本1本変えて、分散補償量を異ならせた構成とする。

【選択図】 図1

出願人履歴情報

識別番号 [000005108]

1. 変更年月日 1990年 8月31日

[変更理由] 新規登録

住 所 東京都千代田区神田駿河台4丁目6番地  
氏 名 株式会社日立製作所